

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Класичний фаховий коледж

(повна назва інституту/факультету)

Електронні інформаційні системи

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 171Електроніка

(код та назва)

освітньо-професійної

(освітньо-професійної / освітньо-наукової)

програми Електронні інформаційні системи

(назва програми)

на тему: Датчики тиску в автоматизації виробництва

Здобувача (ки) групи ЕІс2-91к Карнач Роман Олександрович

(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Роман Карнач

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант¹⁾ _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Обґрунтуванням актуальності теми є те що при великому обсягу застосуванню датчиків тиску в різних сферах автоматизації необхідне вивчення нових типів та побудов таких датчиків.

Мета роботи полягає у вивченні детального огляду основ, класифікації та прогресу в датчиках тиску, а також широку сферу їх застосування, аспекти дизайну та проблеми.

Відповідно до мети, вирішувалися такі задачі:

- мініатюризація датчиків тиску;
- інноваційні датчики на основі новітніх технологій.

У результаті проведених досліджень встановлено, основу датчиків тиску MEMS, їхні принципи роботи, різні аспекти конструкції, класифікація, тип використовуваної чутливої діафрагми та ілюстрації різних механізмів трансдукції. Крім того, ця робота представляє вичерпний огляд сучасної тенденції дослідження датчиків тиску на основі MEMS, їх застосування та прогалини в дослідженнях, які спостерігаються до теперішнього часу, а також масштаби майбутньої роботи, яка не обговорювалася в попередніх оглядах.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є датчику тиску, способи виміру, побудови таких датчиків

Предмет дослідження є датчики тиску.

Робота викладена на 34 сторінках, у тому числі включає 14 рисунків, список цитованої літератури із 24 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВИРОБНИЦТВО MEMS, ДАТЧИКИ, ДАТЧИКИ МІКРОТИСКУ, MEMS, НАНОСЕНСОРИ, ЛІНІЙНІСТЬ, ЧУТЛИВІСТЬ.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ЗАСТОСУВАННЯ ТА БУДОВА ДАТЧИКІВ ТИСКУ	5
1.1 Сфери застосування датчиків тиску.....	5
1.2 Основні конструктивні аспекти датчиків тиску	8
1.3 Датчик тиску, чутливі елементи	9
РОЗДІЛ 2. МІНІАТЮРИЗАЦІЯ ДАТЧИКІВ ТИСКУ	11
2.1 Принцип роботи мініатюризованого датчику тиску	11
2.2 Типи мініатюризованого датчиків тиску та методи вимірювання	14
2.3 Мікроелектромеханічна система датчиків тиску	16
2.4 Конструкція датчика тиску мікроелектромеханічної системи, геометрія діафрагми.....	18
2.5 Датчик тиску мікроелектромеханічної системи та технології виготовлення.....	19
2.6 Дослідження мініатюризація датчиків тиску.....	21
РОЗДІЛ 3. ІННОВАЦІЙНІ ДАТЧИКИ ТИСКУ	23
3.1 Датчик мікротиску Фабрі-Перо (FP) з оптичного волокна на основі структури пучкової мембрани	23
3.2 Використання смугастих діафрагм із рельєфною стрілкою при низькому тиску на основі п'єзорезистивних датчиків тиску на основі мікроелектромеханічної системи	24
3.3 Датчик тиску на основі мікроелектромеханічної системи з фоторезистивним шаром ізоляції.....	26
3.4 Мікроелектромеханічна система п'єзорезистивних датчиків тиску на основі багатошарових плівок PtSe ₂	27
3.5 Датчики мікротиску InAlN або GaN з високою мобільністю електронів для високотемпературних середовищ.....	28
3.6 Гнучкі датчики тиску.....	30
ВИСНОВКИ	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	32

ВСТУП

Перспективи дослідження мікроелектромеханічної системи (MEMS), що швидко з'являються, дозволяють створювати складні та складні мікроструктури на підкладці, що містить рухомі маси, консолі, гнучкі елементи, важелі, зв'язки, демпфери, шестерні, детектори, приводи та багато іншого на одному чіпі.

Одним із початкових продуктів MEMS, які з'явилися в технології мікросистем, є датчик тиску MEMS. Завдяки високій продуктивності, низькій вартості та компактним розмірам ці датчики широко застосовуються в багатьох сферах застосування, а саме в аерокосмічній, автомобільній та біомедичній сферах тощо. Ці вимоги до застосування обумовлюють і накладають величезні умови на конструкцію датчика, щоб подолати виснажлива процедура проектування та виготовлення перед його реальністю. Датчики тиску на основі MEMS дозволяють вимірювати тиск у широкому діапазоні відповідно до вимог застосування.

За останні роки індустрія MEMS стрімко розвивається, і з використанням технології MEMS розробляється все більше систем і пристроїв. Серед типових MEMS-пристроїв, що випускаються, є датчики тиску, акселерометри, гіроскопи, рідинні насоси для мікродзеркал, радіочастотні пристрої. Вони знаходять різноманітне застосування в аерокосмічній, автомобільній, хімічній, біологічній сферах. і оптичних полів. Тому значна кількість досліджень спрямована на розробку та виробництво менших і ефективних пристроїв і компонентів на основі MEMS. Датчики тиску на основі MEMS були першими пристроями, які були успішно виготовлені. Такі датчики тиску є одними з найбільш продаваних пристроїв на світовому ринку серед усіх інших пристроїв, виготовлених за технологією MEMS.

Поточні застосування з'явилися завдяки технології мініатюризації як потреба замінити величезні звичайні пристрої. Таким чином, поточні дослідження прогресують у розробці та виробництві [1]

РОЗДІЛ 1

ЗАСТОСУВАННЯ ТА БУДОВА ДАТЧИКІВ ТИСКУ

1.1 Сфери застосування датчиків тиску

У міру розвитку технології постійно розробляються нові та вдосконалені методи точного вимірювання тиску в рідинах та газах. У більшості випадків датчики тиску потрібно розміщувати у великій кількості в складному обладнанні, а саме в автомобілях, біомедичних програмах тощо. Це важливо для проектування та вибору правильного пристрою для необхідного діапазону вхідних даних і точності, а також пристрій має бути стійким до умов обслуговування та роботи. У міру розширення вимог з'являються нові виклики, такі як широкий діапазон тиску, краща чутливість і придатність до середовища застосування.

Датчики мають бути міцними та здатними витримувати температуру та інші агресивні фактори навколишнього середовища в промислових умовах. У той час як у біомедичних застосуваннях, таких як датчики внутрішньочерепного тиску, датчики шлуночків, біологічна сумісність і розмір менше 1 мм є обмеженнями, накладеними на конструкцію. Для використання в океанічній воді датчики повинні витримувати корозійну атмосферу. Для кількох інших цілей, як-от датчик тиску на крилі літака, датчик має бути обмежений у розмірах.

Ці обмеження на розмір разом із такими вимогами, як чутливість, лінійність, накладають величезні обмеження на конструкцію датчика тиску. Як наслідок, проектування та вибір датчиків тиску є складним завданням і потребує багато часу, необхідно перевірити велику кількість альтернатив. Оскільки проектування здійснюється з використанням рівноважних та статичних умов, також важливо, щоб динамічний аналіз був проведений для

оцінки продуктивності датчика. З огляду на вищезазначені проблеми, дослідження продуктивності системи датчиків має важливе значення.

Типові великі системи, такі як ті, що використовуються в біомедичному приладобудуванні, розробляються і прототипуються інженерами перед їх впровадженням. Вибір або проектування цих підсистем є найбільшою проблемою, з якою стикаються інженери приладобудування.

У таких випадках інженер-проектувальник вдається до моделі віртуального прототипу підсистем перед тим, як побудувати їх фізично та випробувати перед їх об'єднанням у кінцевий продукт. Системи приладів, які використовуються для вимірювання тиску для відображення або керування, є складними і тому потребують різноманітних датчиків тиску з різними діапазонами та чутливістю. Вимоги до конструкції можуть бути у формі вхідного та вихідного діапазону, геометрії, площі датчика, параметра лінійності та чутливості датчика тощо.

Нижче наведено три типові системи, в яких використовуються датчики тиску різних діапазонів і чутливості.

Система приладобудування літака.

Він складається з трьох категорій інструментів на основі функції, а саме:

- прилади польоту;
- прилади двигуна;
- навігаційні прилади.

Інструменти двигуна складаються з таких пристроїв, як температура вихлопних газів і турбіни на вході, датчики тиску масла та палива, датчики потоку, датчики швидкості та крутного моменту тощо. Існують різноманітні вбудовані датчики на основі MEMS, які використовуються в літаках для моніторингу стану здоров'я. На рисунку 1.1 зображено зовнішній вигляд датчику тиску колес що застосовуються в авіації.



Рис.1.1 Зовнішній вигляд датчику тиску [2]

Система містить багато датчиків тиску різних зон вимірювання тиску, таких як тиск у шинах (32 psi), тиск моторного масла (150 psi), тиск палива (30 psi).

Автомобільна контрольно-вимірювальна система.

Робота автомобіля вимагає вимірювання тиску в різних місцях для індикації та контролю. Автомобільні датчики тиску повинні мати високу точність і низьку ціну. Система містить багато датчиків тиску різних зон вимірювання тиску, таких як, тиск у колекторі (120 кПа), тиск з турбонаддувом (250 кПа), тиск дизельного палива (300 кПа), тиск рециркуляції вихлопних газів (250 кПа), тиск холодоагенту (5 МПа), тиск гальмівної оливи (5 МПа), тиск оливи в гідропідсилювачі керма (5 МПа). Приклад датчику тиску дизельного палива для автомобілів зображено на рис. 1.2



Рис.1.2 Зовнішній вигляд датчику тиску дизельного палива для автомобілів [3]

У біомедичній системі використовується велика кількість датчиків тиску на основі MEMS для вимірювання тиску. Система містить багато датчиків тиску в різних зонах вимірювання тиску, таких як артеріальний тиск (120 мм рт. ст. – манометр), внутрішньоочний тиск (15 мм рт. ст. – манометр), респіратор (4 кПа – перепад тиску), вентилятор (25 см Н₂O – перепад тиску), спірометр (4 кПа – перепад тиску). Приклад вимірювання внутрішньоочного тиску зображено на рис. 1.3



Рис.1.3 Вимірювання внутрішньоочного тиску [4]

У наведених вище трьох випадках можна відзначити, що завдання інженерів-проектувальників є складним, оскільки вони мають обрати певну кількість датчиків тиску з відповідним діапазоном і чутливістю, які найкраще відповідають застосуванню.

1.2 Основні конструктивні аспекти датчиків тиску

У розробці системи вимірювання тиску є ряд кроків, які необхідно враховувати, як зазначено в розділах нижче.

Визначення вимог до вимірювань. Перед проектуванням датчиків тиску

необхідно визначити різні вимоги до вимірювань. Огляд датчика вимогами є діапазон вимірювань, змінна вимірювань, вимога до точності для конкретного застосування, робоче середовище, швидкість реакції та номінальне значення.

Ідентифікація типу датчика. Датчик має бути розроблений на основі різних конструктивних змінних, таких як діапазон, точність, лінійність, чутливість, надійність, міцність, життєвий цикл, вимоги до джерела живлення, ремонтпридатність, доступність і вартість.

Визначення відповідної системи обробки сигналу. Вибір обробки сигналу є важливим аспектом механізму чутливості. Вихідний сигнал потрібно обробляти таким чином, щоб його міг зрозуміти користувач, і подальші дії керування можуть вимагатися на основі його вихідного сигналу.

Ідентифікація відповідної системи відображення. Для відповідної системи відображення було вирішено відображати датчик. Факторами, які впливають на систему відображення, є компактність дисплея, тип дисплея, 3D/2D відображуване зображення, записувач, а також робоче середовище тощо.

1.3 Датчик тиску, чутливі елементи

Для цієї мети було використано різноманітні механічні елементи, включаючи (I) сильфони, (II) діафрагми та (III) трубки Бурдона. Датчики, що належать до другої категорії, придатні для мініатюризації та знайшли широке застосування. Залежно від фізичної реалізації діафрагми можна класифікувати як плоскі, гофровані, капсульні тощо.

Типовий набір еластичних мембран, що використовуються для вимірювання тиску на макрорівні, показаний на рисунку 1.4.

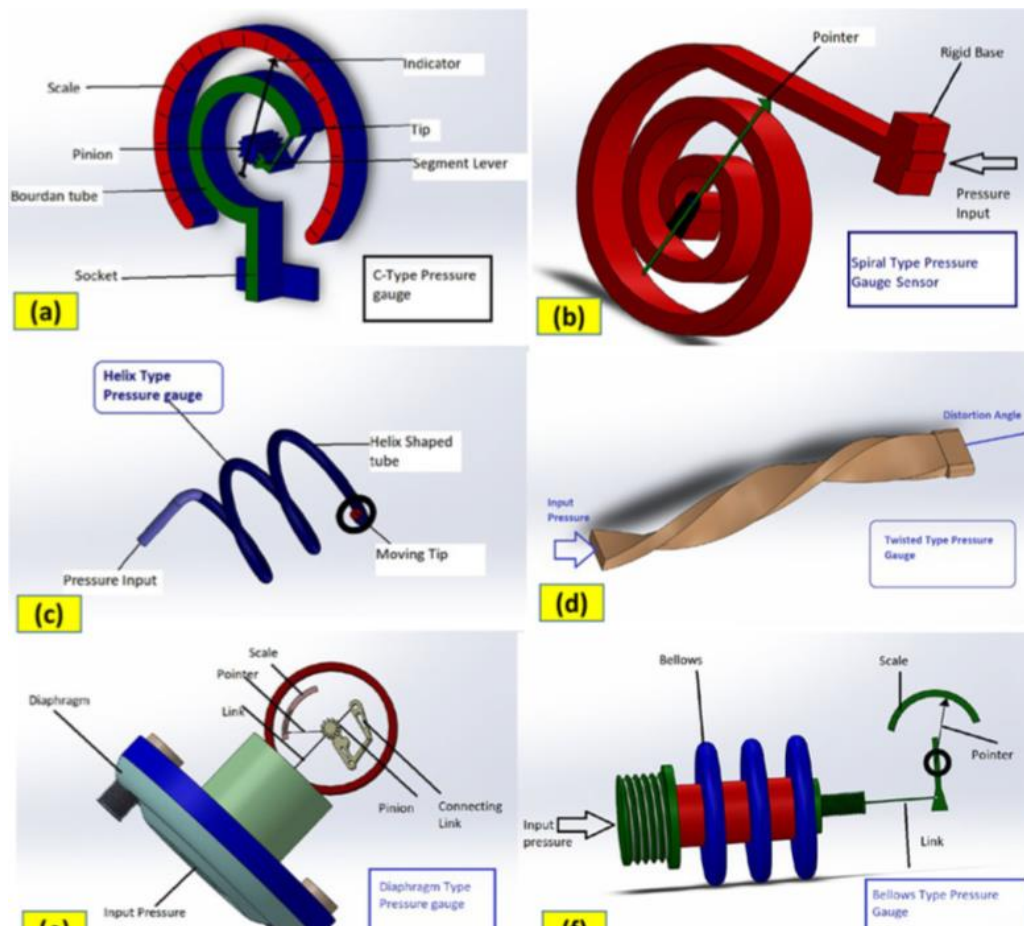


Рис.1.4 Вимірювання тиску на макрорівні [5]

Сенсорні механізми з використанням діафрагм стають все більш популярними, тому що вони є дуже компактні за розміром і вони створюють необхідне зміщення та деформацію для плавної роботи електронних перетворювачів. Для різних застосувань доступний широкий діапазон матеріалів і форм діафрагми.

РОЗДІЛ 2. МІНІАТЮРИЗАЦІЯ ДАТЧИКІВ ТИСКУ

2.1 Принцип роботи мініатюризованого датчику тиску

Щоб зрозуміти, як працює промисловий датчик тиску FUTEK, по-перше, потрібно зрозуміти основну фізику та матеріалознавство, що лежить в основі принципу роботи датчика тиску та п'єзореzистивного ефекту, який вимірюється тензодатчиком (іноді його називають тензодатчиком).

Тензодатчик із металевої фольги — це перетворювач, електричний опір якого змінюється залежно від прикладеної сили. Іншими словами, він перетворює силу, тиск, натяг, стиснення, крутний момент і вагу (так звані датчики ваги) у зміну електричного опору, який потім можна виміряти. На рис.2.1 наведено принцип роботи мініатюризованого датчику тиску.

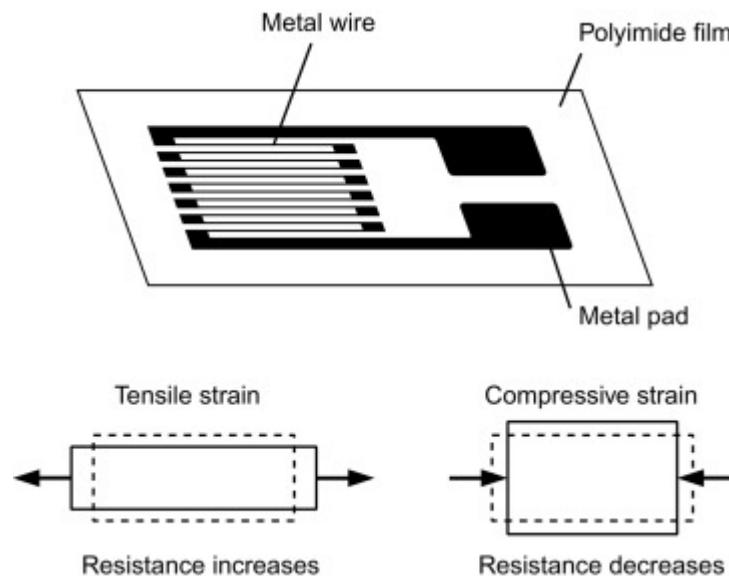


Рис.2.1 Тензодатчик з металевої фольги [6]

Тензодатчики — це електричні провідники, щільно прикріплені до плівки зигзагоподібно. Коли цю плівку натягнути, вона — і провідники — розтягуються й подовжуються. Коли його штовхають, він скорочується і стає коротшим. Ця зміна форми призводить до зміни опору в електричних

провідниках. Деформація, яка використовується в тензодатчику, може бути визначена на основі цього принципу, оскільки опір тензодатчика зростає з прикладеною деформацією та зменшується зі стисненням.

Конструктивно датчик тиску складається з металевого корпусу (його також називають флексуурою), до якого прикріплені тензодатчики з металевій фольги. Корпус датчика вимірювання сили зазвичай виготовляється з алюмінію або нержавіючої сталі, що надає датчику дві важливі характеристики:

- забезпечує міцність, щоб витримувати високі навантаження;
- має еластичність, щоб мінімально деформуватися та повертатися до початкової форми, коли сила знімається.

Датчик тиску перетворює тиск в електричний сигнал. У промислових датчиках тиску використовується п'езорезистивний ефект, який складається з тензодатчиків із металевій фольги, встановлених на діафрагмі. У міру зміни тиску діафрагма змінює форму, викликаючи зміну опору в тензометричних датчиках, що дозволяє електрично вимірювати зміни тиску. Датчики тиску природно створюють електричний сигнал у мілівольтах, який змінюється пропорційно навантаженню та напрузі збудження датчика (мВ/В – мілівольт на вольт) [7]

Датчики тиску з вбудованими підсилювачами генерують сигнали або зі змінною напругою, тобто ± 10 В, або зі змінною силою струму, тобто 4-20 мА. Однак, якщо для програми потрібен цифровий або USB підсилювач датчика тиску, будь ласка, зверніться до нашої сторінки магазину приладів із датчиками сили та підсилювачів.

Датчики напруги розташовані в так званій схемі підсилювача моста Уїтстона. Це означає, що чотири тензорезистори з'єднані між собою як петлевий контур, і вимірювальна сітка вимірюваної сили вирівняна відповідно. Тензометричні мостові підсилювачі забезпечують регульовану напругу збудження та перетворюють вихідний сигнал мВ/В в іншу форму сигналу, більш корисну для користувача. Сигнал, створений мостом тензодатчика, є сигналом низької сили і може не працювати з іншими компонентами системи,

такими як ПЛК, модулями збору даних (DAQ) або комп'ютерами. Таким чином, функції формування сигналу датчика тиску включають напругу збудження, фільтрацію або ослаблення шуму, посилення сигналу та перетворення вихідного сигналу.

Крім того, зміна вихідного сигналу підсилювача датчика тиску відкалібрована так, щоб вона була пропорційною силі, прикладеній до вигину, яку можна розрахувати за допомогою рівняння схеми датчика тиску. На рисунку 2.2 зображено схему датчика вимірювання тиску.

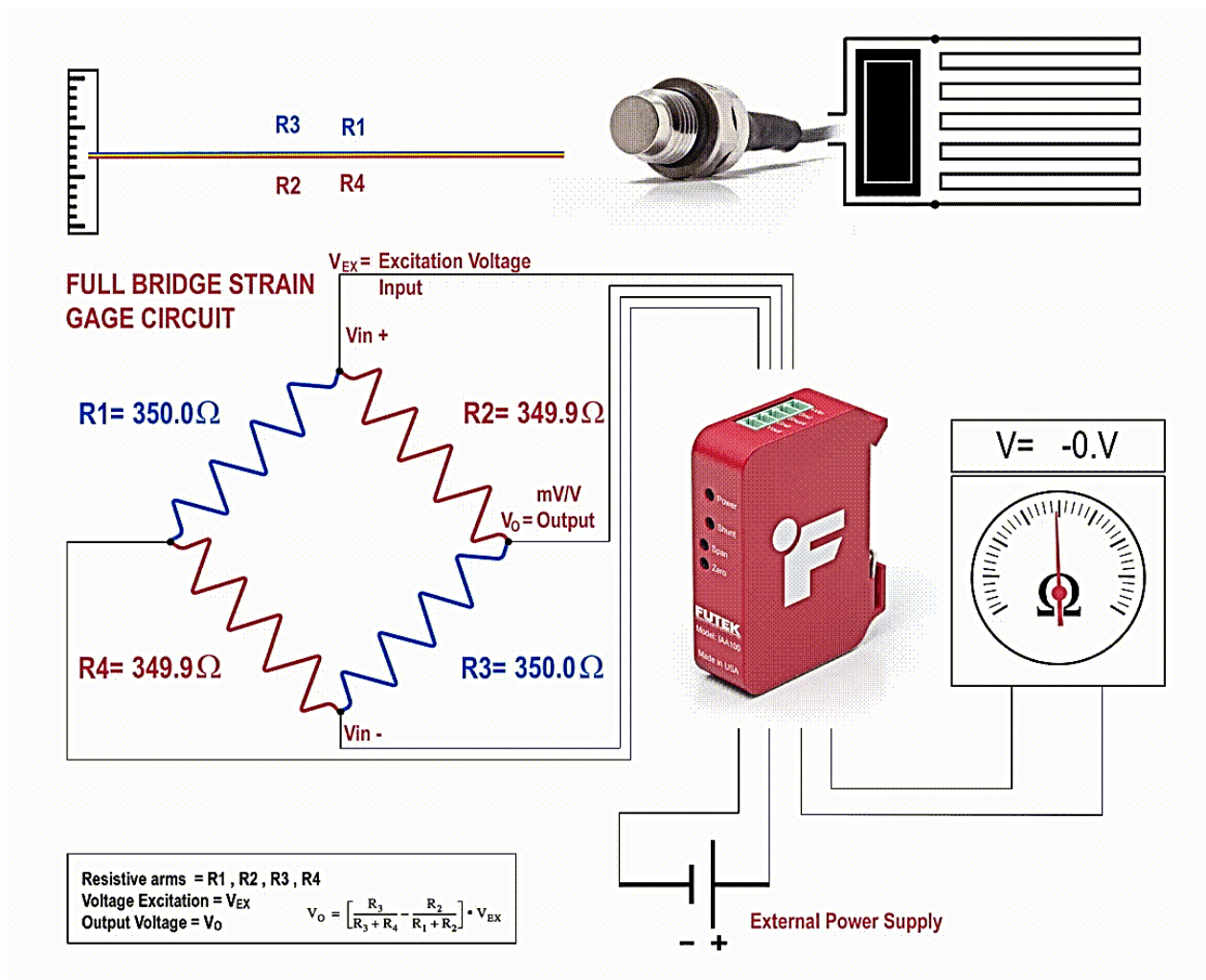


Рис.2.2 Схема датчика вимірювання тиску [8]

2.2 Типи мініатюризованого датчиків тиску та методи вимірювання

Датчики тиску можна класифікувати за типом вимірювання тиску, який вони вимірюють, а також за технологією вимірювання тиску, яку використовує датчик.

На рисунку 2.3 схематично зображено вимірювання рівня в баку за допомогою датчика вимірювання перепаду тиску.

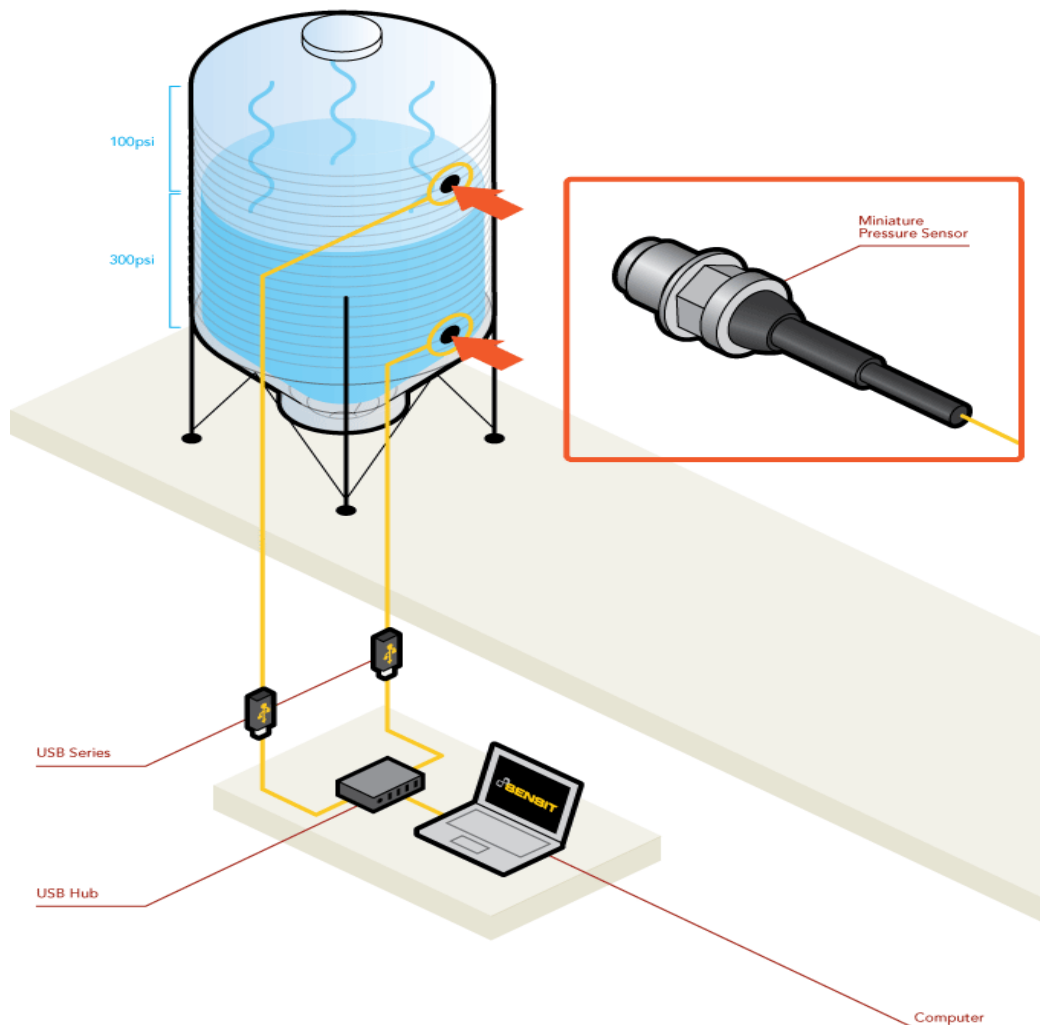


Рис.2.3 Вимірювання рівня в баку за допомогою датчика вимірювання перепаду тиску [9]

Датчик перепаду тиску , перепад тиску – це вимірювання різниці тиску між двома значеннями тиску або двома точками тиску в системі , таким чином вимірюючи, наскільки дві точки відрізняються одна від одної, а не їх величину

відносно атмосферного тиску чи іншого еталонного тиску. наприклад абсолютний вакуум.

Це відрізняється від датчика статичного або абсолютного тиску, який би вимірював тиск, використовуючи лише один порт, і зазвичай датчики диференціального тиску оснащені двома портами, до яких можна приєднати труби та підключити їх до системи у двох різних точках тиску, звідки перепад тиску може бути виміряний та обчислений.

Цей підхід до вимірювання тиску зазвичай використовується для вимірювання потоку рідини або газу в трубах або каналах. Датчик абсолютного або вакуумного тиску: цей датчик вимірює абсолютний тиск, який визначається як тиск, виміряний відносно ідеального герметичного вакууму .

Датчики абсолютного тиску використовуються в програмах, де потрібне постійне порівняння. Ці програми вимагають прив'язки до фіксованого тиску, оскільки їх неможливо просто прив'язати до тиску навколишнього середовища. Наприклад, у високоефективних промислових програмах, таких як моніторинг вакуумних насосів, вимірювання тиску рідини, промислове пакування, контроль промислових процесів, аерокосмічна та авіаційна перевірка, використовується ця техніка.

Коли справа доходить до вимірювання тиску повітря, зокрема для таких застосувань, як барометричні вимірювання погоди або висотоміри, датчик абсолютного тиску є пристроєм вибору. Манометричний або датчик відносного тиску манометричний тиск – це просто окремий випадок диференціального тиску з тиском, виміряним диференціально, але завжди відносно місцевого тиску навколишнього середовища.

У тому ж відношенні абсолютний тиск також можна вважати різницею тиску, де виміряний тиск порівнюється з ідеальним вакуумом. Зміни атмосферного тиску через погодні умови або висоту над рівнем моря безпосередньо впливають на вихід датчика манометричного тиску. Манометричний тиск, вищий за тиск навколишнього середовища, називається позитивним тиском. Якщо виміряний тиск нижчий за атмосферний,

його називають негативним або вакуумметричним тиском. На рисунку 2.4 наведено приклад електронної системи з використанням датчика тиску.

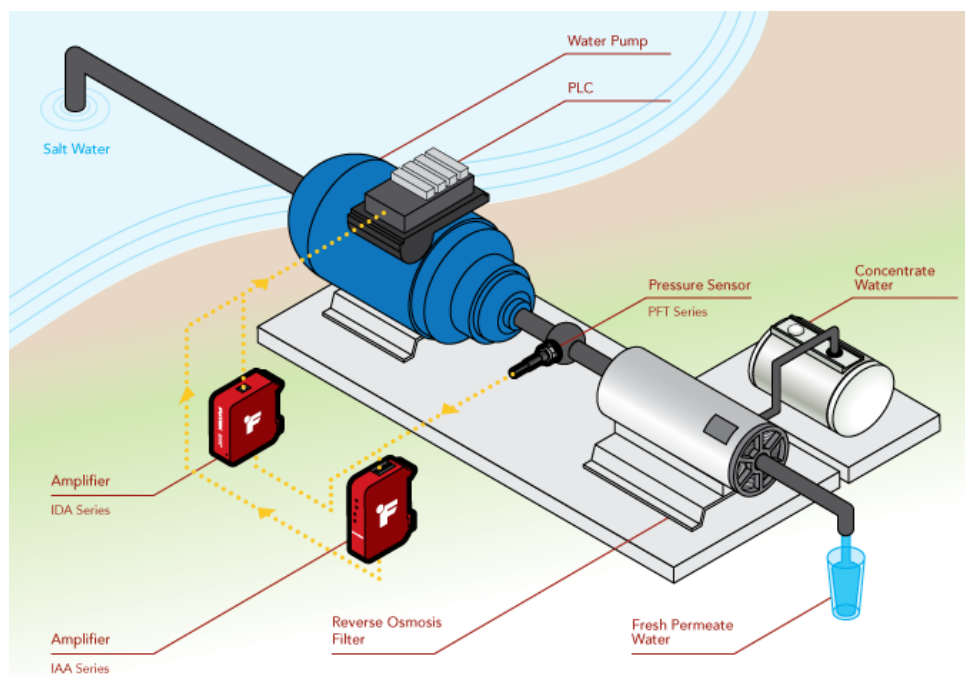


Рис. 2.4 Системи з використанням датчика тиску [10]

2.3 Мікроелектромеханічна система датчиків тиску

У прагненні інженерів-вимірювачів зробити систему компактною багато з вищезгаданих макродатчиків тиску поступаються своїм місцем мікродатчикам тиску. Переваги мініатюрних пристроїв, що призводять до компактних розмірів, з'явилися з розширеними функціями та можливостями для задоволення сучасних інженерних перспектив.

Система малого розміру рухається швидше порівняно з об'ємними системами завдяки меншому ефекту інерції.

Такі пристрої мініатюрного розміру зазнають меншої вібрації та теплових спотворень, оскільки резонансна вібрація системи обернено пропорційна масі.

Менший розмір робить пристрої особливо придатними для застосування в медицині та хірургії та мікроелектронних збірках.

Передумови мікромеханічних систем як датчиків тиску та їх принципи роботи обговорюються в наступному розділі [11]

Мікросенсори тиску засновані на технології MEMS, яка, по суті, є надто малими динамічними механічними пристроями, поведінка яких або контролюється за допомогою електричного сигналу, або вони видають електричний сигнал від свого відхилення та деформації. Існує величезний діапазон можливих застосувань для мікродатчиків і мікророзмірних інструментів.

Методи мікрофабрикації використовуються для виготовлення таких мініатюрних пристроїв у технології MEMS. Розмір MEMS-пристрою може бути навіть меншим за один мікрон, а також структура може варіюватися від простої до складної структури. Елементи в простій структурі не є рухомих типом, але у випадку складної структури, це будь-яка кількість рухомих елементів, керованих інтегрованою мікроелектронікою. Пристрій на основі AMEMS може бути.

Пристрій, де мікроелектроніка використовується для моніторингу та керування мікромашинами пристрою. Як правило, різні мікросенсори використовуються для забезпечення контрольних сигналів мікроелектроніки.

Пристрій, у якому процес серійного виготовлення (мікрообробка та процес створення мікросхем) використовується для виготовлення різних мікроструктур і мікросенсорів.

Пристрій, де різні частини об'єднані з основними частинами, який не потребує окремого складання.

Пристрої MEMS мають кілька явних переваг. По-перше, міждисциплінарний характер технології MEMS має велику різноманітність пристроїв. По-друге, пристрої на основі MEMS виробляються серійно, що забезпечує продуктивність і надійність компонента, а також інші переваги, зменшені вагу, розмір і вартість. По-третє, виробничий процес, прийнятий у MEMS, не може бути досягнутий іншими методами для виконання таких завдань мініатюризації.

Проте існує багато викликів і технологічних перешкод, пов'язаних з MEMS, а саме труднощі у візуалізації, роботі з виготовленням і тестуванням у мініатюрному масштабі, які необхідно вирішити та подолати, перш ніж можна буде реалізувати потенціал. Датчики та виконавчі механізми на основі MEMS можна знайти в різноманітних додатках на багатьох ринках, таких як автомобільний, комунікаційний, аерокосмічний, оборонний, електроніка та медичні додатки.

2.4 Конструкція датчика тиску мікроелектромеханічної системи, геометрія діафрагми

Незалежно від типу датчика, підвищення чутливості було головним завданням у дослідницькій галузі датчиків тиску на основі MEMS. Геометрія діафрагми відіграє важливу роль у визначенні ефективності датчика. Для певного тиску напруга, спричинена краями круглої діафрагми, є найменшою, ніж квадратна діафрагма, але центральне відхилення є більшим у випадку круглої діафрагми.

Отже, кругла діафрагма рекомендована в тих застосуваннях, де максимальна відхилення відіграє ключову роль. Загалом використовувані мембрани є прямокутними або квадратними, оскільки вони займають меншу площу, що полегшує літографію та виготовлення порівняно з круглими мембранами [12]

Оскільки напруга, викликана квадратною діафрагмою, є дуже високою, тому така діафрагма більш чутлива, ніж інші але вона також має високий градієнт напруги, і будь-які недоліки в процесі виготовлення вплинуть на продуктивність датчика.

З іншого боку, прямокутні мембрани мають менший градієнт напруги, що робить розміщення п'єзрезисторів менш схильним до помилок. Окрім вибору підходящої геометрії діафрагми різні модифікації конструкції, такі як поділ поздовжніх і поперечних вимірювальних приладів на дві частини або

використання діафрагми з боковинами або подвійної діафрагми були застосовані для підвищення ефективності датчика.

Деякі дослідники використовували підхід тиску розриву для розробки діафрагм із більшою чутливістю. Модифікації матеріалу, такі як використання полікремнієвих п'єзорезисторів або фосфористих дифузних полікремнієвих п'єзорезисторів або діафрагм із кремнію на ізоляторі (SOI), також намагалися підвищити чутливість датчика [13]

Датчики, що містять альтернативні п'єзорезистивні матеріали, розташовані на полімерних діафрагмах, показали вищу чутливість, ніж звичайні датчики.

2.5 Датчик тиску мікроелектромеханічної системи та технології виготовлення

Дві основні технології виготовлення, які зазвичай використовуються, це об'ємна мікрообробка та мікрообробка поверхні. Об'ємна мікрообробка – це технологія виготовлення MEMS, яка описує структури на основі певного процесу травлення, що використовується в об'ємі підкладки. Це найбільш широко використовувана технологія мікрообробки. Кремнієві пластини зазвичай надають перевагу для об'ємної мікромеханічної обробки. На них шаблон маски переноситься за допомогою фотолітографії, а тривимірні структури утворюються за допомогою процесів селективного вологого сушіння в поєднанні з технікою травлення.

Вологе травлення, таке як ізотропне та анізотропне травлення, зазвичай виконується з тильної поверхні підкладки. Ізотропне травлення виконується для аморфних або полікристалічних матеріалів, а анізотропне травлення використовується для монокристалічного кремнію. Зазвичай для ізотропного травлення використовується плавикова кислота азотно-оцтова кислота (HNA), а найпоширенішими травителями є етилендіамін і пірокатехол, гідроксид тетраметиламонію, КОН (гідроксид калію) і гідразин.

Швидкість травлення цими травителями залежить від орієнтації кристала та відіграє вирішальну роль у формуванні структури. Кремнієві пластини з орієнтаціями (100) і (110) використовувалися в об'ємній мікрообробці. Сухе травлення, яке класифікується як реактивне іонне травлення (RIE) і глибоке RIE (DRIE), відбувається шляхом видалення матеріалів підкладки газоподібними травителями.

Методи на основі плазми і метод травлення кремнію з високим співвідношенням сторін DRIE, у якому чергуються процеси плазмового травлення матеріалу підкладки та осадження захисних від травлення полімерів на боках. Більшість пристроїв MEMS, таких як датчики тиску, акселерометри, гіроскопи тощо, були виготовлені за цією технікою.

Поверхнева мікрообробка. Процес мікрообробки поверхні – це техніка проявлення поверхні шар за шаром на підкладці. Ці шари складаються з тонких плівок, які можуть бути як структурними, так і жертвеними шарами. Жертвовані шар вибирається в залежності від використовуваного структурного шару. Важливу роль відіграє використання травника, який протравлює жертвенний шар, не впливаючи на структурний шар.

Сумісні з ІС матеріали, такі як кремній, полікремній, поліїмід нітриду кремнію, і метали, такі як золото, алюміній, мідь тощо, використовуються для формування структурних та жертвувальних плівок. У поверхневій мікрообробці властивості підкладок не так важливі, як об'ємна мікрообробка, оскільки структури створюються на верхній поверхні підкладки, а також дорогі кремнієві пластини можна замінити скло-пластмасовою підкладкою, яка є досить дешевою. Це узгоджується з сучасною технологією виготовлення мікросхем. Але є обмеження у формуванні 3D-складних структур у цьому методі. Поверхнева мікрообробка вимагає більше етапів виготовлення, ніж масова мікрообробка, і, отже, є дорожчою. Цей процес можна використовувати для виготовлення набагато складніших пристроїв зі складною функціональністю [14]

2.6 Дослідження мініатюризація датчиків тиску

З огляду літератури та вивчення ключових результатів досліджень в області мікросенсорів тиску, були визначені наступні області для дослідження. Різні дослідники використовували підхід тиску розриву, щоб отримати оптимальні розміри діафрагми датчика тиску, враховуючи товщину та довжину сторони діафрагми для кращої чутливості та факторів безпеки.

Однак даних щодо підходу до тиску розриву, включаючи максимальний прогин діафрагми для отримання більшої лінійності, мало.

Були опубліковані звіти, які підкреслюють вплив геометрії діафрагми та роль, яку відіграє положення п'єзореzystора у вирішенні продуктивності датчика, але дослідження профілю напруги на діафрагмі різних геометрій.

Порівняння еволюції ємності з використанням різної геометрії діафрагми, щоб визначити правильний механізм вимірювання, не акцентується. Міст Уїтстона та оцінка резонансної частоти також важливі для отримання кращої точності вихідних даних датчиків.

Хоча датчики тиску на полімерній основі були виготовлені, дані щодо конструкції діафрагми SU-8 для п'єзореzystивного датчика тиску обмежені.

Але, використовуючи полімер SU-8 або деякі інші функціональні полімери, а саме, PDMS тощо, як діафрагму для вимірювання тиску з ВНТ або подібні наноматеріали як п'єзореzystори, чутливість можна додатково підвищити, а діапазони вимірювання тиску можна розширити.

Проблеми досягнення високої чутливості з найкращою лінійністю стають головним напрямком досліджень у проектуванні та розробці датчиків тиску на основі MEMS.

Крім того, нещодавні ознаки прогресу в матеріалах, засобах зв'язку, гнучкості підкладки відкрили нові шляхи в цій галузі. У цьому контексті дослідники запропонували різні методи для досягнення цього, які будуть описані нижче. На рисунку 2.5 наведено CAD модель, що складається з

поліімідної мембрани, платини як п'єзорезистивного матеріалу та закритої камери SU-8 (поперечний переріз по ширині пристрою)

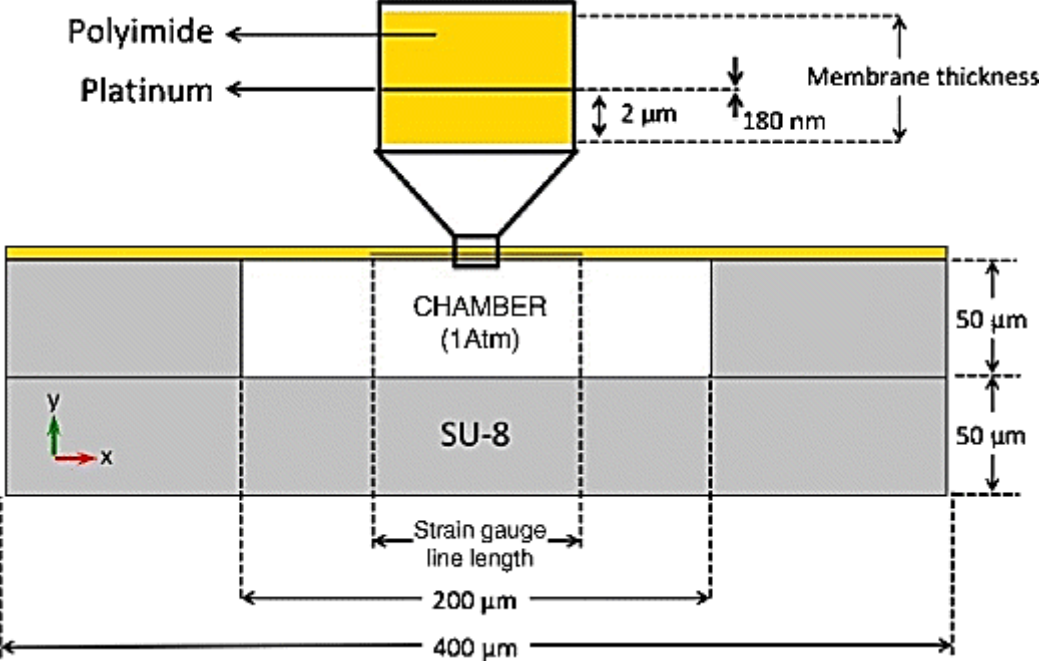


Рис.2.5 Датчик тиску що складається з поліімідної мембрани, платини як п'єзорезистивного матеріалу та закритої камери SU-8 [15]

РОЗДІЛ 3. ІННОВАЦІЙНІ ДАТЧИКИ ТИСКУ

3.1 Датчик мікротиску Фабрі-Перо (FP) з оптичного волокна на основі структури пучкової мембрани

Оптоволоконний датчик мікротиску Фабрі-Перо (FP) складається з одного оптичного волокна та чутливої кремнієвої діафрагми. Для двосторонньої передачі світла використовується одне оптичне волокно. Сенсорна кремнієва діафрагма має структуру променевої мембрани для підвищення чутливості та лінійності датчика [16]

Ця діафрагма з пучковою мембраною виготовлена за технологією MEMS. Автор [17] повідомив, що чутливість мікродатчика FP із використанням діафрагми з променевою мембраною може бути досягнута до 242 нм/кПа в діапазоні вхідного тиску 0-10 кПа. На рисунку 3.1 схематично зображено датчик мікротиску Фабрі-Перо [17]

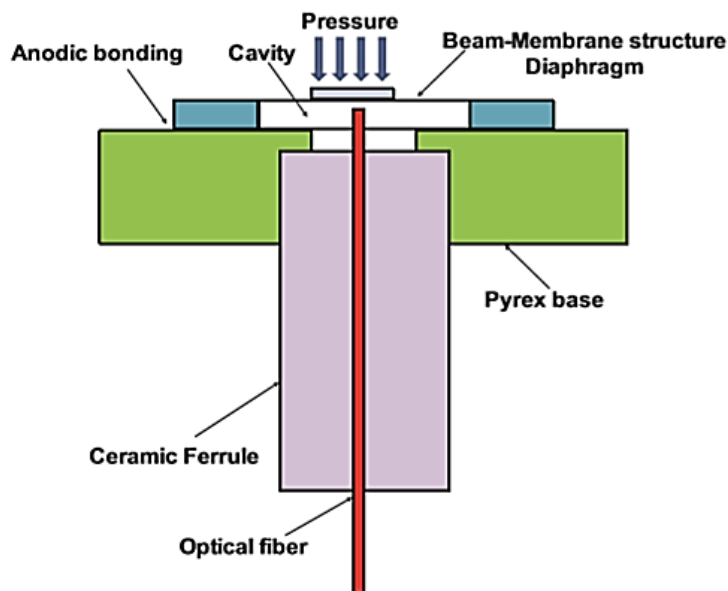


Рис.3.1 Датчик мікротиску Фабрі-Перо [18]

Повна установка такого датчика складається з чотирьох частин:

- балкова мембранна;
- одномодове волокно;
- Pyrexbase;
- керамічний наконечник.

Світло проходить через одномодове волокно вертикально до сенсорної головки. Під час цього процесу частина світла відбивається від волокна, а інша частина передається на Si-діафрагму балкової мембрани та відбивається. Зазвичай використовується поліхроматичне джерело світла, а оптичний сигнал інтерпретується методом фазової модуляції. Таким чином, довжину порожнини FP можна легко визначити, а прикладений тиск на кремнієву діафрагму променевої мембрани можна отримати з оптичного спектру за допомогою аналізатора спектру.

3.2 Використання смугастих діафрагм із рельєфною стрілкою при низькому тиску на основі п'єзорезистивних датчиків тиску на основі мікроелектромеханічної системи

Автори [21] запропонували смугасту тиснену діафрагму зі стрілкою для розробки п'єзорезистивного датчика тиску низького тиску. Було проаналізовано, що використання смугастої діафрагми зі тисненою стрілкою може створювати більше напруження, ніж плоска діафрагма, отже, покращує чутливість датчиків.

Водночас автор також наголосив на оптимізованій конструкції, щоб мати високий ступінь лінійності на виході датчика. Схема типового датчика тиску на основі MEMS показана на рисунку 3.2 (а), який працює на основі принципу п'єзорезистивного ефекту.

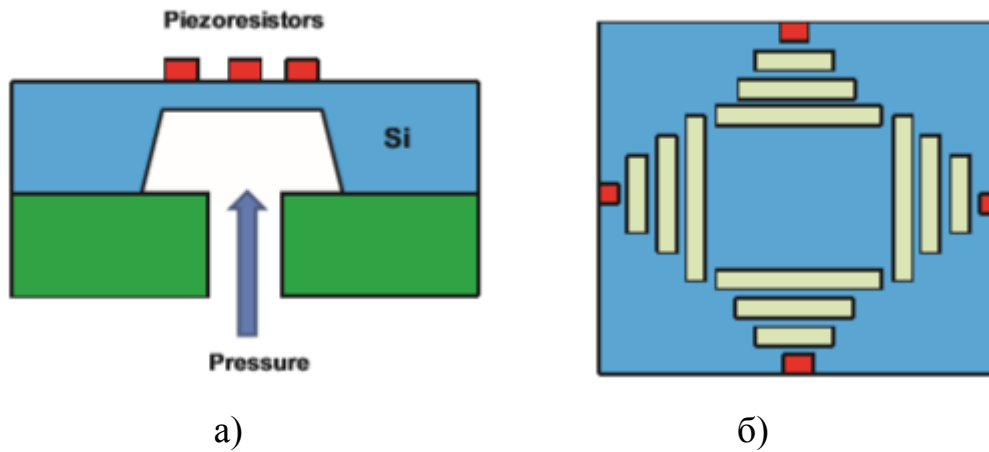


Рис. 3.2 Поперечний розріз датчика тиску (а),
вид зверху на датчик тиску (б) [19]

Сенсорна мікросхема в основному виготовлена з кремнію за технологією MEMS. Чутливий елемент датчика тиску MEMS — кремнієва матриця з тонкою вигравірованою діафрагмою.

У смугастій стрілці рельєфна діафрагма досягається шляхом витравлювання плоскої діафрагми з верхньої поверхні, як показано на рисунку 3.2 (б).

Чотири п'єзрезистори вливаються у верхню поверхню кремнієвої діафрагми таким чином, що максимальне напруження може бути викликане в цьому положенні.

Ці п'єзрезистори з'єднані з алюмінієвим шаром для встановлення конфігурації моста Уїтстона для перетворення зміни значення опору в електричний потенціал.

Тиск, який прикладається до кремнієвої мембрани, призведе до прогину мембрани, відповідно зміниться опір, що також спричинить зміну вихідної напруги.

3.3 Датчик тиску на основі мікроелектромеханічної системи з фоторезистивним шаром ізоляції

Огляд потенціалу бездротових мікросистем MEMS і TFT для вимірювання тиску в ШКТ. Представлено статейний огляд можливостей мікроелектромеханічних систем (MEMS) і технології товстої плівки (TFT) для виробництва бездротової мікросистеми датчика тиску. Моделювання та аналіз сенсора MEMS на основі п'єзрезистивних ефектів. У роботі проведено детальне дослідження та аналіз п'єзрезистивних ефектів мембрани, підвішеної в повітряному датчику. На рисунку 3.3 зображено зовнішній вигляд датчику тиску на основі мікроелектромеханічної системи з фоторезистивним шаром ізоляції.



Рис. 3.3 Датчику тиску на основі мікроелектромеханічної системи [20]

Сучасні розробки конструкції діафрагми оптимізовані для отримання високої чутливості, гнучкості з можливістю самовідновлення. Однак процес

виготовлення багатьох датчиків тиску надто складний і його важко інтегрувати з традиційною мікроелектромеханічною системою на основі кремнію (MEMS).

Автори [22] демонструють масштабований та інтегрований датчик тиску на основі контактного опору на основі провідної мережі вуглецевих нанотрубок та шару ізоляції фоторезисту. Вони досягли високої чутливості до 95,5 кПа 1 , дуже низького порогу чутливості нижче 16 Па, швидкого часу відгуку, який становить менше 16 мс, і нульового енергоспоживання без тиску навантаження. Чутливість, поріг чутливості та динамічний діапазон можна налаштувати шляхом зручного зміни діаметра отвору та товщини ізоляційного шару.

3.4 Мікроелектромеханічна система п'єзорезистивних датчиків тиску на основі багат шарових плівок PtSe₂

Як правило, діафрагма вважається двовимірним шаруватим матеріалом для застосування в мікро та наносистемах через її граничну товщину. Диселенид платини (PtSe₂), захоплюючий і невивчений двовимірний матеріал дихалькогенідів перехідних металів (TMD) є особливо цікавим, оскільки процес його низькотемпературного зростання є масштабованим і сумісним із кремнієвою технологією. На рисунку 3.4 зображено зовнішній вигляд датчику тиску на основі багат шарових плівок PtSe₂



Рис. 3.4 Датчику тиску на основі багат шарових плівок PtSe₂ [21]

Повідомили про потенційне використання тонкого PtSe₂ у п'єзорезистивних датчиках тиску MEMS. Вони провели всі експерименти з напівметалевими плівками PtSe₂, вирощеними за допомогою термічної конверсії платини при CMOS-сумісній температурі 400°C.

На експериментальній установці згинальної консольної балки вони виявили дуже високий негативний калібрувальний коефіцієнт $\mu_{\text{p}} = -84,8$ у плівок PtSe₂, виміряних за допомогою тензодатчиків.

Цей негативний калібрувальний фактор демонструє дуже високу чутливість датчиків. Автори використовують теорію функціоналу густини, щоб зрозуміти походження виміряного негативного калібрувального коефіцієнта. Результати цих експериментів дослідили перспективне використання PtSe₂ у MEMS та NEMS у майбутньому.

3.5 Датчики мікротиску InAlN або GaN з високою мобільністю електронів для високотемпературних середовищ

Мікромасштабний датчик тиску, що використовує кільцеподібний транзисторний чутливий елемент InAlN або GaN з високою рухливістю електронів, був виготовлений і охарактеризований під прикладеним тиском. AlN/GaN використано Simaterialin для забезпечення монолітної інтеграції з електронікою, що робить його здатним працювати в середовищі з високою температурою. Автори [22] розробили аналітичну модель системи перетворення тиску, щоб порівняти зміну концентрації носіїв двовимірного електронного газового листа для гетероструктур InAlN і AlGa_{1-x}N під дією прикладеного тиску.

Модель підтверджує, що високий вміст алюмінію в InAlN і великі п'єзоелектричні константи AlN призводять до більшої реакції тиску в гетероструктурах InAlN або GaN порівняно з гетероструктурами AlGa_{1-x}N або GaN.

Щоб експериментально дослідити архітектуру датчика тиску InAlN або GaN, датчик тиску радіусом 500 м радіусом був електрично охарактеризований під прикладеним тиском від 0 до 28,5 psig.

Чутливість датчика зростала, коли напруга затвора досягала порогової напруги. Автори продемонстрували, що чутливість (зміна струму) становила 0,64%/psig при $V_{GS} = 5$ В, $V_{DS} = 2,2$ В. Щоб спостерігати за впливом температури, вольт-амперна характеристика (ID-VDS) вивільненої та невивільненої кільцевої форми приладів вимірювалася до 300°C.

При всіх температурах струм випущених кільцеподібних пристроїв зменшувався порівняно з твердотільним пристроєм, що пояснюється зменшенням напруги розтягування тонкої плівки між нижчими буферними шарами GaN і кремнієм. Ця робота демонструє доцільність використання архітектур датчиків InAlN або GaN для високотемпературних застосувань (дослідження космосу, ядерна енергетика, свердловини та спалювання). На рисунку 3.5 зображено архітектуру датчика мікротиску.

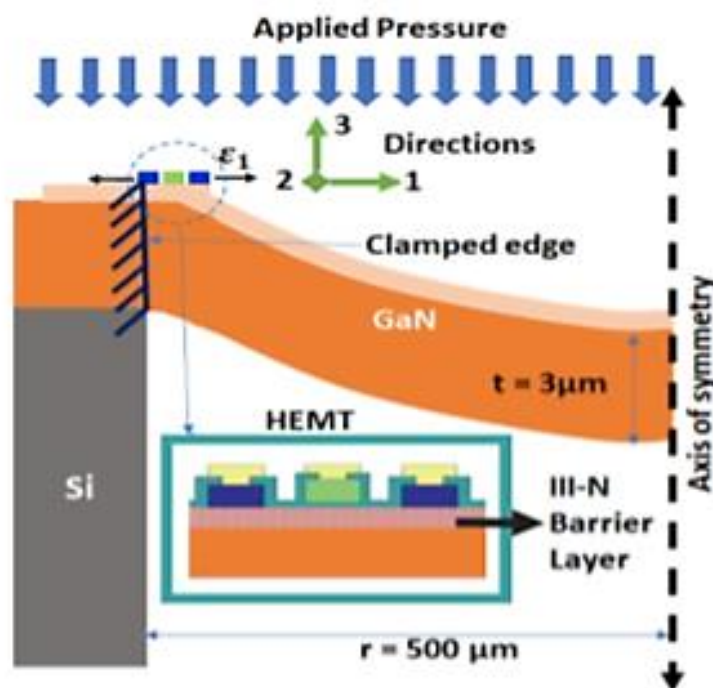


Рис. 3.5 Датчика мікротиску [22]

3.6 Гнучкі датчики тиску

Багато дослідницьких центрів у сенсорній області було зміщено з сенсорів на основі твердої підкладки на гнучкі. Тут основу, на якій мають розробляти всі функціональні модулі, вибрано так, щоб добре відповідати будь-якій поверхні, що представляє інтерес. Гнучкі датчики мають помірну здатність до деформації [23]

Гнучкий датчик тиску, який складався з п'єзоелектричного датчика та п'єзорезистивного датчика для дискретного вимірювання пульсової хвилі та статичного тиску. У цій роботі пороеластичні матеріали використовувалися для досягнення гнучких з'єднань і зменшення перешкод між датчиками. Це дослідження показало, що гнучка матриця датчиків тиску не тільки відображає інформацію про глибину пульсових хвиль радіальної артерії в широкому діапазоні статичного тиску, але також має хорошу повторюваність і ефективність захисту від перешкод [24]

Важливі характеристики датчика тиску, які визначають ефективність датчиків, також досліджувалися різними дослідниками. Ці маршрути можуть бути вивчені для покращених властивостей дрібномасштабних матеріалів, таких як графен, вуглецеві нанотрубки, інші функціональні матеріали, а також різні інші механізми передачі сигналу.

Висновки

1. Показано що робота зосереджена на фундаментальних аспектах датчиків тиску, класифікації MEMS-датчиків тиску на основі геометрії діафрагми та механізму трансдукції, проблемах їх проектування тощо. У ній також узагальнено останні дослідження мікродатчиків тиску, які показують, що справжні проблеми полягають в оптимальній конструкції сенсорної діафрагми. щоб отримати не тільки високу чутливість, але й чудову лінійність у датчиках тиску на основі MEMS.

2. Було відображено що дослідницька робота більше зосереджена на прикладному дизайні, напр. Датчики мікротиску InAlN або GaN з високою рухливістю електронів розроблені для зон з високою робочою температурою. Подібним чином датчик тиску на основі MEMS з ізоляційним шаром фоторезисту призначений для використання там, де потрібен кращий час відгуку, а мікродатчик тиску на основі структури балкової мембрани призначений для використання з вимогами високої чутливості та лінійності.

3. Встановлено що застосування та класифікація датчиків тиску MEMS на основі геометрії діафрагми та механізму трансдукції, а також інша геометрія чутливої діафрагми, що використовується в мікродатчиках тиску, і проблеми з її проектуванням..

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Akay, M. (2006), Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering, UnitedStatesofAmerica, JohnWiley&Sons, Inc. Angel, S. and Daniel, R.J. (2017), «Підвищення чутливості діафрагмами з рельєфною смугастою стрілкою в п'єзорезистивних датчиках тиску MEMS низького тиску», In Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA), 6 січня 2017 р., IEEE, стор.1-5.

2. Аршак, А., Аршак, К., Волдрон, Д., Морріс, Д., Коростинська, О., Джафер, Е. та Лайонс, Г. (2005), «Огляд потенціалу бездротових мікросистем MEMS і TFT для вимірювання тиску в шлунково-кишковому тракті», Medical Engineering&Physics, Vol.27No.5, pp.347-356.

3. Азіз, Н.А., Байс, Б., Хамза, А.А. і Меджліс Б.Й. (2008), «Характеристика травника HNA для виготовлення масиву кремнієвих мікроголок», ICSE 2008. Міжнародна конференція IEEE 25 листопада 2008 року з напівпровідникової електроніки, IEEE, стор.203-206.

4. Бао, М. and Wang, W. (1996), «Майбутнє мікроелектромеханічних систем (MEMS)», Sensors and Actuators A: Physical, Vol.56Nos1/2, pp.135-141. Bassous, E. (1978), «Виготовлення нових тривимірних мікроструктур шляхом анізотропного травлення (100) і (110) кремнію», IEEE Transactions on ElectronDevices, Vol. 25 №10, стор.1178-1185.

5. Berns, A., Buder, U., Obermeier, E., Wolter, A. та Leder, A. (2006), «Матриця датчиків AeroMEMS для вимірювання тиску стіни з високою роздільною здатністю», Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 132No.1, стор.104-111.

6. Бхат, К.Н. та Наяк М.М. (2013), «Датчики тиску MEMS – огляд проблем у технології та упаковці», Journal of Smart Structures and Systems, Vol. 2, п.1.

7. Bryzek, J., Roundy, S., Bircumshaw, B., Chung, C., Castellino, K., Stetter, J. R. та Vestel, M. (2006), «Marvelous mems», IEEE C Circuitsand Devices Magazine, Vol.22No.2, стор.8-28.

8. Чапін К.А., Міллер Р.А., Доулінг К.М., Чен Р. та Сенескі Д.Г. (2017), «Висока мобільність електронів InAlN/GaN мікродатчики тиску для високотемпературних середовищ», *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.263, pp.216-223.

9. Чоудхарі, Н. та Каур, Д. (2016), «Тонкі плівки та гетероструктури зі сплавів пам'яті форми для застосувань MEMS: огляд», *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 242, стор.162-181.

10. Core, T.A., Tsang, W.K. і Шерман, С.Дж. (1993), «Технологія виготовлення інтегрованого поверхневого мікромашинного датчика», *Solid State Technology*, Vol. 36 №10, с.39-45.

11. Фіорілло, А.С., Крітелло, К.Д. і Пуллано, А.С. (2018), «Теорія, технологія та застосування п'єзорезистивних датчиків: огляд», *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.281

12. Fung, C.K., Zhang, M.Q., Dong, Z. and Li, W.J. (2005), «Виробництво на основі CNT MEMS п'єзорезистивні датчики тиску з використанням нанозбірки DEP», 5-а конференція IEEE з питань нанотехнологій 2005, 11 липня, IEEE, стор.199-202.

13. Guckel, H. (2011), «Поверхневі мікромашинні датчики тиску», *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 28 No.2, стор.133-146.

14. Гупта, А. та Пал, П. (2018), «Гнучкі датчики для біомедичного застосування», «Екологічні, хімічні та медичні датчики», Спрінгер, Сінгапур, с.287-314.

15. Huang, Y., Fan, X., Chen, S.C. та Zhao, N. (2019), «Нові технології гнучких датчиків тиску: матеріали, моделювання, пристрої та виробництво», *Advanced Functional Materials*, Vol.29No.12, p. 1808509.

16. Єна, С. Гупта, А. Піппара, Р.К. та Пал, П. (2019), «Бездротові сенсорні системи: огляд», *Датчики для автомобільної та аерокосмічної промисловості*, стор.143-192.

17. Єна, С. та Гупта, А. (2019), «Вбудовані датчики для моніторингу стану літака», *In Sensors for Automotive and Aerospace Applications*, Springer, Singapore,

pp.77-91.

18. Jena, S., Pandey, C. and Gupta, A. (2021), “Mathematical modeling of different diaphragm geometries in MEMS pressure sensor”, *Materials Today: Proceedings*.

Kaabi, L., Kaabi, A., Sakly, J. and AbdelMalek, F. (2007), “Модельовання та аналіз датчика MEMS на основі п’єзореzистивних ефектів”, *Materials Science and Engineering: C*, Vol.27No.4, pp .691-694.

19. Ковач Г.Т., Малуф Н.І. і Петерсен, К.Е. (1998), “Bulk micromachining of silicon”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86 No.8, стор.1536-1551.

20. Лян, Б., Чень, В., Хе, З., Ян, Р., Лінь, З., Ду, Х., Шан, Ю., Цао, А., Тан, З. і Гуй, Х.(2017), «Високочутливий, гнучкий датчик тиску на основі MEMS з ізоляційним шаром фоторезисту», *Малий*, Том 13 № 44, стор. 1702422.

21. Liu, S., Zhang, S., Zhang, Y., Geng, X., Zhang, J. and Zhang, H. (2018), «Нова гнучка матриця датчиків тиску для інформації про глибину променевої артерії», *Датчики та Виконавчі механізми А: Physical*, Vol.272, pp.92-101.

22. Malhaire, C. та Barbier, D. (2003), «Дизайн датчика тиску з полісиліконового ізолятора з оригінальним полікремнієвим макетом для суворих умов», *Thin Solid Films*, Vol. 427 № 1/2, стор.362-366.

23. Mallon, J.R., Jr. Pourahmadi, F., Petersen, K., Barth, P., Vermeulen, T. and Bryzek, J. (1990), “Сенсори низького тиску, що використовують діафрагми з виступами та прецизійне травлення”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 21 №1-3, с.89-95.

24. Тулуза. Rossetti, A., Codeluppi, R., Golfarelli, A., Zagnoni, M., Talamelli, A. і Tartagni, M. (2011), «Дизайн і характеристика полімерних датчиків тиску для бездротового моніторингу вітрил», *Датчики та Приводи А: Фізика*, Том 167 № 2, стор. 162-170.